

建模与仿真的发展和应用

王行仁

北京航空航天大学, 北京 100083

[摘要] 模型是对系统、实体、现象、过程的数学、物理或逻辑的描述, 仿真是模型随时间变化的实现方法。建模与仿真已广泛应用于产品研制的全生命周期: 需求分析、概念论证、初步设计、详细设计、生产制造、试验和训练。重点讨论建模仿真的某些关键技术。

[关键词] 建模; 仿真; 模拟器; 分布交互仿真; 虚拟样机

[中图分类号] TP391.9

[文献标识码] A

[文章编号] 1000- 7857(2007)02- 0022- 06

Development and Application of Modelling and Simulation

WANG Xingren

Bei Hang University, Beijing 100083, China

Abstract: A model is a physical, mathematical, or logical representation of a system, entity, phenomenon, or process. Simulation is a method for implementing a model over time. Modelling and Simulation are widely used in all life cycle of products: requirements analysis, concept development, preliminary design, detailed design, manufacturing, testing, and training. Some key technologies of modelling and simulation are discussed in this paper.

Key Words: modelling; simulation; simulator; distributed interactive simulation; virtual prototyping

CLC Number: TP391.9

Document Code: A

Article ID: 1000- 7857(2007)02- 0022- 06

0 引言

20 世纪 50—60 年代, 自动控制领域普遍采用计算机模拟方法研究控制系统动态过程和性能。“计算机模拟”实质上是数学模型在计算机上的解算运行, 当时的计算机是模拟计算机(analog computer), 后来发展为数字计算机(digital computer), 在模拟计算机上的模型解算称为“analog simulation”, 而在数字计算机上的模型解算称为“digital simulation”。为了规范术语与译名, 1979 年在烟台举行的全国系统仿真学术会议建议将“simulation”译为“仿真”, “analog simulation”译为“模拟仿真”, “digital simulation”译为“数字仿真”, 考虑到原来已习惯将“simulation”译为“模拟”, 必要时这一译法也可以使用。

1 建模与仿真的几个基本概念

模型、仿真的定义有各种表述。一种简单的基本定义如下。

模型——对系统、实体、现象、过程的数学、物理或逻辑的描述。

仿真——模型随时间变化的实现方法。

广义而言, 仿真是采用建模和物理的方法对客观事物进行抽象、映射、描述和复现。客观事物包括真实环境中的实体/系统、自然环境(地形、大气、海洋、空间)和人的行为等。至于仿真环境, 它是一种虚拟环境, 是真实环境的映射, 包括模型、数据、软件、物理效应设备等。仿真环境与真实环境的映射关系如图 1 所示, 建模与仿真的概念简图如图 2 所示, 建模与仿真的应用过程如图 3 所示。

建模与仿真即对客观事物进行仿真并研究, 其可详细分为图 4 中展示的 13 个步骤^[1]:

1) 问题的确定——确定研究的目的和需要解决的问题;

2) 项目规划——包括硬件、软件、人力等资源;

3) 系统的确定——确定系统如何工作, 以及边界和限制条件;

4) 建立概念模型——用图形(如方框图、流程图)或伪码定义系统的部件、变量和交互关系的方法, 建立初步的模型;

5) 初步试验设计——根据试验输出的要求, 选择从模型采集的数据及其形式和范围;

6) 输入数据的准备——收集模型需要的输入数据, 确定数据来源,

收稿日期: 2006- 12- 25

作者简介: 王行仁, 男, 北京市海淀区学院路 37 号北京航空航天大学, 教授, 主要研究方向为飞行控制和系统仿真;

E- mail: wxr33@buaa.edu.cn

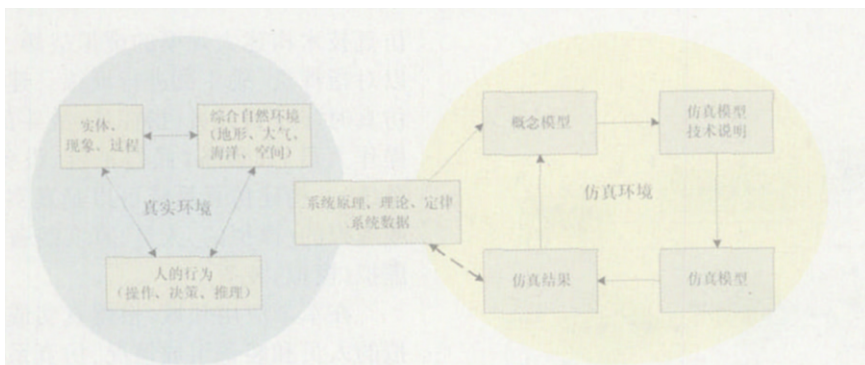


图 1 仿真环境与真实环境的映射关系
Fig. 1 Reflection relationship of real environment and simulation environment

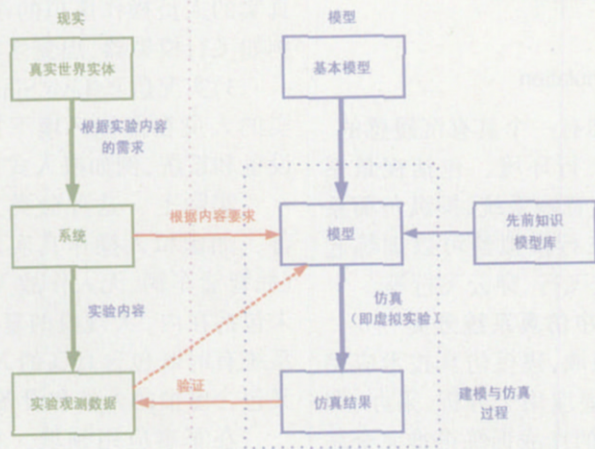


图 2 建模与仿真的概念简图
Fig. 2 Modelling and simulation



图 3 建模与仿真的应用过程
Fig. 3 Process of modelling and simulation

并将数据格式标准化;

7) 模型转化——采用相应的程序语言或仿真语言将模型编成程序;

8) 校核——检查仿真模型是否

正确反映了输入和输出数据;

9) 验证——保证概念模型正确表示了实际系统;

10) 最终试验设计——设计能产

生期望信息的试验, 以及测试的顺序;

11) 试验——仿真运行, 产生期望的数据;

12) 分析和解释——对仿真运行产生的数据进行推断, 得出结论;

13) 结束工作和编写文档——记录研究结果, 提出报告, 将模型及其使用写成文档。

2 仿真系统

如上所述, 仿真是在计算机上建立模型运行, 但这属于数学仿真, 随着技术的发展, 许多应用领域建立仿真系统时除了模型外还要求将实物和人员包含在仿真回路中。

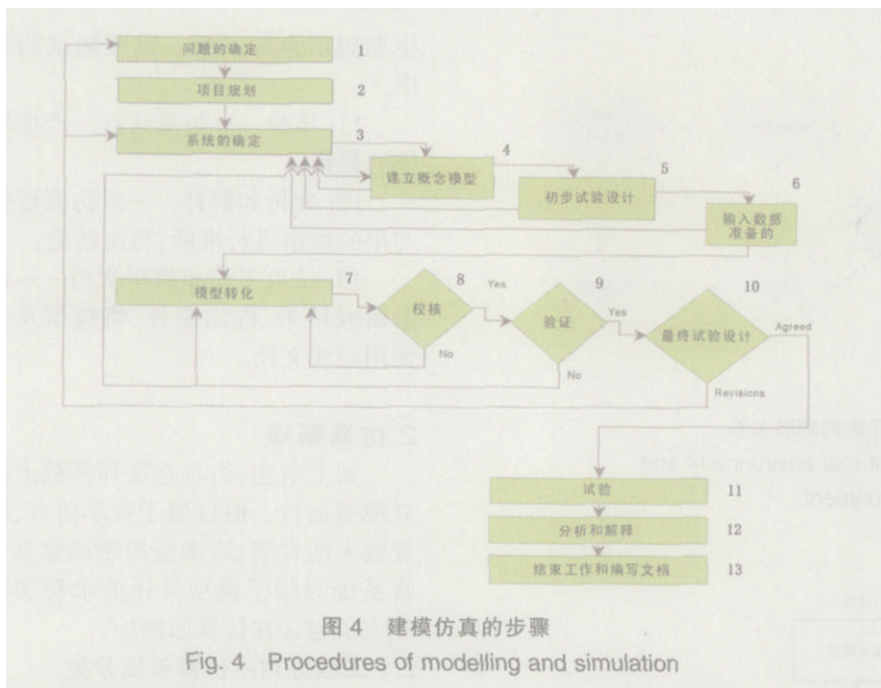
2.1 工程应用中仿真系统分类

在工程应用中仿真系统可分为以下 4 类。

1) 数学仿真 (Mathematical Simulation)。用数学模型描述客观事物, 根据数学模型编成程序在计算机运行。

2) 硬件在回路仿真 (Hardware in the Loop Simulation), 又称为半实物仿真。除了用数学模型描述客观事物外, 还将部分实物硬件接入仿真系统, 使仿真系统更逼近真实系统。例如飞行仿真系统, 除了飞行动力学、发动机动态特性等用数学模型描述外, 还将飞行控制、制导、导航系统实物 (例如惯性传感器、光电传感器, 控制计算机, 或执行机构等) 接入飞行仿真系统。半实物仿真系统需要有各种物理效应设备, 它将数字信号转变为机械运动 (例如三自由度转台)、光电效应 (例如目标模拟器) 或压力变化 (例如动压、静压模拟器) 等。

3) 软件在回路仿真 (Software in the Loop Simulation)。随着计算机技术的发展应用, 许多设备和系统采用数字化技术, 含有大量应用软件, 通过仿真来检查和试验应用软件是重要的技术途径和手段, 除了用数学模型描述客观事物外, 还将数字设备的软件接入仿真系统。例如飞行仿真系统, 除了飞行动力学、发动机动态特



性等数学模型外, 还将飞行控制软件、导航软件、飞行管理软件等接入飞行仿真系统。

4) 人在回路仿真 (Man in the Loop Simulation)。除了用数学模型描述客观事物外, 人员(操作人员, 指挥人员, 决策人员)作为一个环节参与仿真系统回路中。例如在地面训练飞行员驾驶飞机飞行的飞行模拟器是一个典型的人在回路仿真系统, 见图

5。飞行模拟器有一个具有沉浸感的、虚拟的空中飞行环境, 包括视景系统、运动系统、音响系统、操纵负荷系统等。通过飞行模拟器可以训练起飞、着陆、航线飞行、穿云飞行等。

2.2 军事领域中仿真系统分类

在军事领域, 建模仿真技术应用凸显重要, 主要应用于分析、采办、训练。现代战争的作战训练很难完全靠实战演练, 费用高、风险大, 通过建模

仿真技术构建大规模的虚拟战场, 可以对指挥员、战斗员进行训练。建模仿真时涉及到人员(指挥员、战斗员、操作人员)和装备(武器平台、设备、系统), 构建仿真系统可以是真实的或虚拟的(模拟的)人员, 真实装备或虚拟(模拟)装备。

在军事应用领域, 根据真实或虚拟的人员和装备组成情况, 仿真系统可以分为以下 3 类。

1) 构造仿真(Constructive Simulation)。虚拟的人员操作虚拟的设备和系统, 例如计算机生成兵力系统。

2) 虚拟仿真(Virtual Simulation)。真实的人员操作虚拟的设备和系统, 例如飞行模拟器、坦克驾驶模拟器。

3) 实况仿真(Live Simulation)。真实的人员在虚拟环境下操作真实的设备和系统, 例如嵌入式仿真系统。

实际上, 这种分类方法并不完善, 如虚拟人操作真实设备和系统(如智能车辆、无人作战飞机)的情况未包括在内。大规模的复杂军用仿真系统有时既包含真实的人员和设备, 又包含虚拟的人员和设备。

在军事应用领域, 根据模型粒度、实体规模、应用目的和范围, 将建



(a) A-320 飞机飞行模拟器
(a) A-320 Flight simulator



(b) 军机飞行模拟器座舱内视图
(b) Cockpit view of military aircraft flight simulator

图 5 人在回路仿真系统
Fig.5 The system of man in the loop simulation

模与仿真又划分为 4 个层次:

1) 战略级——多军兵种, 多武器平台对抗的虚拟战场, 研究作战策略, 采用构造仿真类型, 模型粒度较低, 实时性要求不高;

2) 任务级——执行指定任务的作战, 中等模型粒度, 采用构造仿真或虚拟仿真类型;

3) 交战级——一对一或少对少武器平台对抗作战, 例如空战模拟, 模型粒度较细, 一般采用虚拟仿真类型, 实时性要求较高。

4) 工程级——武器平台的工程设计与制造, 模型粒度细。

2.3 系统仿真中的重要技术

在 20 世纪 80 年代, 系统仿真领域有两项技术的应用取得突破性进展, 使得仿真科学得到更快更全面的发展, 它们是可视化和网络化。

2.3.1 可视化技术

传统的系统仿真过程和结果都是依靠打印数据和曲线显示, 这样会带来许多缺陷。随着计算机图形图像生成技术的发展, 人们可以采用二维或三维图形图像更为直观形象地显示仿真的动态过程和参数变化; 并且由于人或硬件在回路仿真系统需要计算机生成的图形、图像、虚拟环境等给人员或传感器提供具有真实感的信息, 所以可视化技术显得尤为重要。目前, 可视化技术的进一步发展是具有沉浸感的虚拟现实 (Virtual Reality) 技术。

2.3.2 网络化技术

在传统上, 简单仿真系统采用单台计算机实现, 但是随着大规模复杂仿真系统的出现, 单台计算机已不能满足要求, 于是采用多台计算机联网的方式, 包括局域网和广域网, 需要解决的关键技术之一即是计算机之间数据和信息的交互通讯。网络化技术后来进一步发展为分布交互仿真 (Distributed Interactive Simulation, DIS)。

2.4 仿真系统其他特点及在我国发展简况

仿真系统发展的另一特点是其建立的规模愈来愈大, 形成了地域分

布、动态交互、信息联网的复杂仿真系统, 例如军事训练的虚拟战场、多学科设计的虚拟样机系统。

在我国, 建模与仿真技术领域已取得很大发展和应用。早在上世纪 50 年代就开始在自动控制领域对连续系统进行计算机模拟, 60 年代建立了控制系统的半实物仿真系统, 70 年代开始自行研制了飞行模拟器、电站模拟器、船舶驾驶模拟器、汽车驾驶模拟器、机车驾驶模拟器, 开发了仿真语言和仿真软件, 80 年代发展了计算机图形图像生成技术, 90 年代建立了分布交互仿真应用系统。目前在复杂系统仿真、建模仿真支撑环境、虚拟样机技术、仿真工具软件等方面进行开发研究和应用。

3 建模与仿真的关键技术简述

建模与仿真发展中的几项关键技术有以下几方面。

3.1 分布交互仿真 (Distributed Interactive Simulation)

分布在不同地理位置的仿真系统、模型、计算机、设备, 通过网络构成分布联网仿真系统。仿真运行时, 仿真系统中的模型之间、计算机之间, 甚至仿真系统之间有大量数据和信息需要传送和交互。这些数据和信息包括连续量 (离散化的连续量)、离散量 (离散事件) 和声音图像多媒体信息等, 通讯方式有广播、组播、单播等多种。为了保证将正确信息在正确的时间传送到正确的地点, 必须有统一的数据通讯协议, 在分布交互仿真系统中研究解决的正是这类问题。目前广泛采用 DIS, HLA/RTI 协议, 进一步将发展基于 Web 的通讯、仿真网格等; 关于分布交互仿真技术研究, 应着重于解决仿真系统中的数据管理和时间管理。

3.2 复杂系统的建模与仿真 (Modelling and Simulation of Complex System)

客观事物中自然的和人工的系统有许多是复杂系统, 包含非线性、不确定性、不稳定性、模糊性、不能预

测的突变性等等, 其中变量的数目有几百甚至几千, 这种复杂系统在基础科学、应用科学和技术、工程技术、社会和经济、军事领域大量存在, 一般不易求解, 而建模与仿真是研究复杂系统的强有力工具。

3.3 建模仿真环境 (Modelling and Simulation Environment)

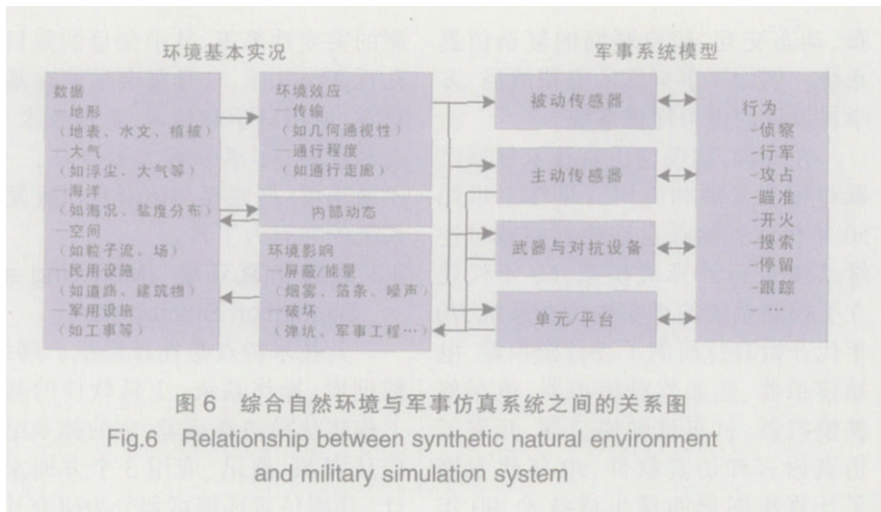
其技术特点是在计算机、网络、数据库、操作系统、工具软件的基础上构建建模仿真环境, 它的体系结构应从资源、通讯、应用 3 个方面来设计。建模仿真环境可划分为研究开发环境 (Research and Development Environment) 和运行环境 (Run Time Environment), 两者有共享的资源。研究开发环境没有严格的时间管理要求, 但要保证事件发生的前后顺序, 而仿真运行环境必须有严格的时间管理, 保证实时性。一般情况下, 仿真系统运行时调用的资源是固定的、静态的, 要实现调用动态资源的建模仿真环境体系结构则更复杂。

3.4 综合自然环境的建模与仿真 (Modelling and Simulation of Synthetic Natural Environment)

综合自然环境包括地形、大气、海洋、空间。它对飞行器飞行、舰船航行、车辆行驶、传感器探测、人的决策等有很大影响, 这种影响称为环境效应, 例如: 风对飞行器飞行轨迹的影响, 地形对视线的影响, 云层对红外传感器探测的影响等。同样, 实体和系统对自然环境也产生干扰和破坏, 称为环境影响, 例如车辆行驶在地面留下的痕迹和扬起的尘土。自然环境的建模与仿真将描述这些自然现象, 除了模型描述外, 还需要更多大量数据以场的形式描述说明它是随时间和空间变化的。图 6 为综合自然环境与军事仿真系统之间的关系图, 环境模型包括环境效应、环境影响和环境内部动态 3 部分。

3.5 仿真资源库 (Simulation Repository)

仿真资源库包括数据库、模型



库、工具软件库等。仿真系统的开发和运行要用到大量数据和模型，例如飞行器动力学模型和气动数据、全球导航台数据、综合自然环境（包括地形、大气、海洋、空间）模型和数据、产品性能的模型和数据，人的行为模型和数据等等。这些数据是多维的，例如飞机气动数据取决于飞行速度、飞行高度、迎角、侧滑角等，综合自然环境数据取决于经度、纬度、高度。为了查询和调用，必须建立仿真数据库/模型库，并设计解决多分辨率数据和模型存储结构、多用户调用、实时调用等问题。为了快速有效建立模型和仿真系统，可以研制或采用各种工具软件。

3.6 基于仿真设计和虚拟样机 (Simulation Based Design and Virtual Prototyping, SBD and VP)

建模与仿真技术已经不仅仅应

用于试验和训练，发展到现在已普遍应用于产品和型号研制的全过程，包括需求分析、方案论证、初步设计、详细设计、生产制造、试验试飞、训练、维护等各个阶段。分析、设计和试验阶段的动态性能研究中，采用建模与仿真技术更显得重要。美国联合攻击战斗机 (Joint Strike Fighter, JSF) 基于建模仿真的研制过程如图7所示。

建模仿真技术可应用于分析、研究、设计、制造、试验、训练等各个环节。基于仿真设计 (Simulation Based Design, SBD)、基于仿真研究开发 (Simulation Based Research and Development, SBRD)、基于仿真采办 (Simulation Based Acquisition, SBA) 等都是建模仿真为基础。在真实产品设备或系统生产出来之前，应通过建模仿真在计算机上结合图形图像显示建立虚拟样机，进行分析设计和试

验。目前许多行业采用虚拟样机技术，缩短了产品研制周期、降低了成本、提高了质量。

3.7 计算机生成技术 (Computer Generation Technology)

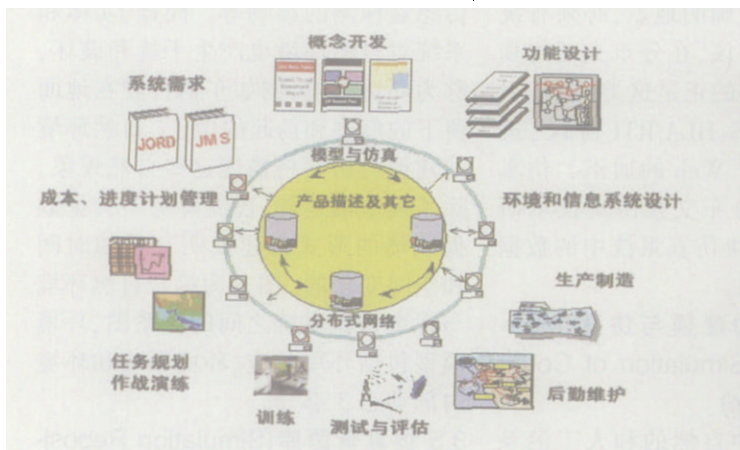
计算机生成技术是建模、算法与软件的结合，例如计算机生成图像 (Computer Generation Image, CGI)、计算机生成兵力 (Computer Generation Force, CGF)、计算机生成想定 (Computer Generation Scenario, CGS) 等等。

3.8 综合显示技术 (Synthetic Display Technology)

采用综合显示技术 (即可视化技术) 构建的虚拟环境主要提供给人员和传感器。工程技术人员通过综合显示可形象直观地观察仿真动态过程。人在回路仿真系统中的人员通过综合显示可沉浸在周围虚拟环境里，获取信息，进行分析判断和操作，例如飞行模拟器的视景系统给飞行员提供驾驶舱外的景象。传感器通过综合显示环境可感受可见光图像、红外图像，例如导弹半实物仿真系统中的目标模拟器。综合显示包括二维、三维图形图像显示和立体声。图8为机场指挥塔台模拟器综合显示系统。

3.9 校核、验证、确认 (Verification, Validation, Accreditation, VVA)

模型和仿真系统的逼真度、可信度是至关重要的，它决定仿真结果有无价值。应根据仿真的目的和要求，



对模型和仿真系统进行严格的校核、验证、确认。校核是将模型和仿真与技术说明、要求比较,验证是将仿真结果与实物试验数据比较,确认即是权威机构根据应用目的对模型和仿真进行确认。需要强调的是,VVA 的关键在于获取真实的试验数据。

4 结束语

综上所述,建模与仿真以模型理论、系统理论、算法理论和软件工程等为基础。模型又是仿真的基础,仿真系统中的模型应具有互操作性、可重用性、可重组性。仿真系统中除模型外,还可以包含实物设备和人员在回路中。系统仿真是计算机技术的应用,它随计算机技术的发展而发展,如操作系统、数据库、网络、软件等与仿真系统密切相关。

现在,建模与仿真已成为继理论研究、实验研究之后第 3 种认识和改造客观世界的重要方法和手段,它可以对已有的或设想的事物进行研究;并且现实中建模与仿真已广泛应用于产品和型号研制的全生命周期。因此,仿真科学与技术是一门新兴的综合性学科。

参考文献(References)

- [1] NUBILE E, AMBROSE E, MACKAREL A. Development of a procedure for manufacturing modelling and simulation [EB/OL]. [2004-12-20]. http://www.ctvr.ie/docs/O&M_Pubs/IMC%2021%20Paper.pdf.
- [2] OREN T. Future of modelling and simulation: Some development areas [EB/OL]. [2003-04-21]. <http://www.sim-summit.org/0304/0304b.pdf>.
- [3] BREATENECKER F. Software for modelling and simulation history, development, trends and challenges. [2006-01-10]. <http://www.simvis.org/Tagun2006/proceedings/0.2.pdf>.
- [4] PACE D K. Modelling and simulation verification and validation challenges [J]. Johns Hopkins APL technical Digest, 2004, 25(2): 163-172.
- [5] VANGHELUWE H. An introduction to multi-paradigm modelling and simulation[EB/OL], [2002-03-05]. <http://www.cs.mcgill.ca/~hv/publications/02.AIS.campam.pdf>.
- [6] BIRKEL P A. SNE conceptual reference model[R]//In Proceedings of the Fall Simulation Interoperability Workshop[C]. SISO, 1998, 98F-SIW-018.

(责任编辑 赵佳)

·封面文字说明·

中国自主研制的第三代战机歼-10 揭开神秘面纱

2007 年 1 月 5 日,中国航空工业第一集团公司在北京举行歼-10 单座型战斗机揭幕仪式,中国自主研制的第三代战机“歼-10”神秘的面纱自此被揭开。

歼-10 战斗机是中国自主研制的新一代多用途战斗机,分单座型、双座型两种。作为第三代战斗机,歼-10 采用了全新电子系统、电传操作等大量新设计、新技术和新工艺,有着比歼-7、歼-8 更优良的作战性能;在紧急短距起飞、空中机动、超低空突防、对地攻击等方面超过西方第三代战机,可以和歼-8、FC-1、苏-27SMK、苏-30 及防空导弹系统高低搭配,构成大密度、大纵深、高中低空互为重叠的立体防空网。据悉,歼-10 战机目前已经批量装备我军,将成为中国空军和海军航空兵进入 21 世纪的主要空中装备,有效提高了中国空军防务作战的能力。

歼-10 战机自 1986 年正式开始研制,经整个中国航空工业各有关单位通力合



作,广大军工科研人员克服重重困难,突破了以先进气动布局、数字式电传飞控系统、高度综合化航空电子系统和计算机辅助设计为代表的一系列航空关键技术,创造了

共和国航空史上的数十个“第一”;空军试飞员承担了数十项极限试飞任务,对数百个课题、数千个参数进行了上千架次的试飞检验,圆满完成定型试飞任务,确保了歼-10 战斗机按时装备部队。歼-10 战斗机开创了我国军机在设计定型前进行小批量生产并交付部队领先试用的先河,也实现了中国军机从第二代战机向第三代战机的历史性跨越。

有关军事专家认为,虽然歼-10 战斗机性能不如美国第四代战斗机,但其优良的基础设计和大体国产化的配套设备使其能够与西方战机抗衡;更为重要的是,通过研制歼-10 战机,中国在航空武器装备水平、航空技术水平和相应的专业科研队伍培养等方面得到了长足的发展。

本期封面为歼-10 战斗机起飞图,由《国际航空》杂志提供。

(本刊记者 赵佳)